

UN NOUVEAU GALVANOMÈTRE

PAR

W. EINTHOVEN.

Depuis la publication de la thèse ¹⁾ de M. BOSSCHA „De galvanometro differentiâli”, la technique de la mesure des courants a fait bien des progrès. On distingue actuellement un grand nombre de types de galvanomètres, qui sont non seulement utiles aux recherches faites au laboratoire de physique mais dont l'électrotechnique, l'électrophysiologie et la pratique de la médecine tirent aussi du profit. Et presque chacun de ces nombreux modèles a des avantages spéciaux pour le but qu'on a en vue en construisant l'instrument.

L'instrument, dont nous allons parler dans ces pages et qu'on pourrait nommer „galvanomètre à corde”, servira principalement dans les recherches électrophysiologiques. En examinant les phénomènes électriques des muscles, des glandes, des nerfs, des organes des sens, bref de presque tous les tissus et organes vivants, on doit tenir compte de leur grande résistance. Les forces électromotrices produites n'étant en outre qu'assez faibles, il faudra le plus souvent se servir de galvanomètres très sensibles et d'une grande résistance intérieure, permettant des mesures de courants de 10^{-3} et 10^{-10} ampères.

Au moyen de plus d'un galvanomètre usuel on peut facilement faire ces mesures. Cependant la propriété commune à tous c'est que le mouvement du système d'aiguilles et du miroir qui y est attaché se fait lentement. Si le mouvement est oscillatoire, la durée d'une oscillation est de quelques secondes au moins, et quand on rend le mouvement à peu près apériodique en appliquant un grand amortissement, la durée de la déviation est encore considérablement prolongée.

¹⁾ Leyde, 1854.

Le galvanomètre cuirassé astatique au système d'aiguilles petites de DU BOIS et RUBENS, représentant un des plus sensibles si pas le plus sensible des instruments usuels, peut servir d'exemple. Les auteurs donnent comme *sensibilité normale* ¹⁾ de leur instrument le nombre 1000. On entend par *sensibilité normale* la déviation en millimètres sur une échelle placée à un mètre du miroir. On pose pour l'intensité du courant 10^{-6} amp., pour la résistance intérieure du galvanomètre 1 ohm et pour la durée d'une oscillation 5 secondes. On admet que la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant. Puis on suppose que pour une intensité de courant donnée la déviation est en raison directe de la racine carrée — ou, ce qui est souvent plus exact, de la $\frac{2}{3}$ puissance — de la résistance. Enfin la déviation est proportionnelle au carré de la durée de l'oscillation.

On en déduit qu'avec la plus grande résistance intérieure de 8000 ohms que MM. DU BOIS et RUBENS ont donné à leur galvanomètre, un courant de 10^{-10} amp. produit une déviation de 1 mm. sur une échelle placée à un mètre de distance, si la durée d'une oscillation est de 2,6 sec. Le petit poids et la grande mobilité du système d'aiguilles, joints à l'exiguité du miroir, ne permettent guère dans ces conditions d'observer avec précision des déviations beaucoup plus petites qu'un mm. Aussi peut-on admettre la dite mesure comme limite d'une déviation facile à observer.

En amortissant le mouvement du système d'aiguilles jusqu'à produire l'apériodicité on prolonge la durée de la déviation. Cette durée devient infiniment longue en théorie mais dans la pratique on peut régler l'amortissement en sorte qu'au bout de 5 secondes au plus après le commencement du mouvement toute la déviation soit à peu près terminée. Il est vrai qu'une durée de 5 secondes pour une déviation galvanométrique n'offre pas d'inconvénients pour beaucoup de mesures, mais il n'en est pas de même pour toutes. Pour maintes observations électrophysiologiques la dite durée est beaucoup trop longue. Les forces électromotrices produites dans les tissus vivants par leur réaction sur plusieurs excitations, sont généralement d'une durée très courte et pour la plus grande partie épuisées au bout d'une petite partie d'une seconde.

Il est vrai qu'il y a des galvanomètres avec une durée d'oscillation

¹⁾ H. DU BOIS et H. RUBENS. Panzergalvanometer. Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1900, S. 77.

plus courte que la susdite mais ceux-ci ne sont pas assez sensibles pour les expériences physiologiques. J'ai particulièrement en vue l'instrument construit par MM. DEPREZ et D'ARSONVAL où un cadre mobile est suspendu entre les pôles d'un aimant fixe. ¹⁾

Les dits oscillographes, dont celui de M. DUBDELL est certainement le plus connu, ont une très courte durée d'oscillation: celle-ci peut être réduite à 0,0001 sec. L'instrument, qui est utile à l'électrotechnique ne peut pas servir aux mesures physiologiques, n'étant sensible qu' à des courants assez intenses. L'échelle étant à une distance de 50 cm., la déviation pour un ampère entier est de 290 mm.

Ce que nous nous sommes proposé en construisant le galvanomètre à corde, c'est de joindre une sensibilité permettant des mesures électro-physiologiques à une grande rapidité de déviation. L'instrument se compose principalement d'un conducteur mobile, c'est à dire d'une corde, tendue d'une manière convenable entre les pôles d'un électroaimant. Nous exposerons le plus facilement les raisons qui nous ont amené à construire cet instrument, en partant d'une forme actuelle du galvanomètre de DEPREZ-D'ARSONVAL et en nous demandant quelles modifications nous pourrions y apporter à son profit.

Nous devons considérer en premier lieu la *sensibilité normale*. Nous avons déjà expliqué ce terme plus haut. On ne pourra jamais modifier la sensibilité normale en changeant la force directrice du fil de suspension, pas plus qu' en augmentant ou diminuant le nombre des tours, *si le poids et les dimensions du cadre sont conservés*. Par contre elle augmentera proportionnellement à l'intensité du champ magnétique, et les modifications apportées dans les dimensions du cadre ne manqueront pas non plus d'exercer une influence déterminée. Seulement cette dernière influence doit être examinée de plus près.

Maintenons provisoirement la forme du cadre et posons nous comme première question: „Quelle sera la conséquence de la suppression de quelques tours, *si l'on n'agrandit pas le diamètre du fil pour suppléer à la diminution de poids et de dimensions du cadre?*”

En supprimant tant de tours que le nombre en est n fois plus petit,

¹⁾ La maison SIEMENS et HALSKE fournit un modèle de ce galvanomètre, au moyen duquel on peut mesurer des courants très faibles. Cependant il n'a plus l'avantage de la courte durée de l'oscillation.

le cadre devient n fois plus léger et le moment d'inertie est également n fois plus petit, de sorte que la durée d'une oscillation devient \sqrt{n} fois plus courte. La résistance est n fois plus faible et la déviation pour la même intensité de courant n fois plus petite.

Il résulte de ces changements de durée d'oscillation, de résistance et de déviation que la sensibilité normale augmente \sqrt{n} fois. Pour l'augmenter autant que possible il faut donc laisser sur le cadre **aussi peu de tours que possible**. S'il n'y avait pas d'inconvénients pratiques le cadre à un seul tour offrirait le plus d'avantages.

Nous devons nous demander en second lieu: „Quel changement subira la sensibilité normale à la suite de la modification du diamètre du fil?” Si le diamètre du fil devient m fois plus petit, le moment d'inertie diminue m^2 fois. Il en résulte que la durée de l'oscillation devient m fois plus courte. La déviation pour une intensité donnée reste la même, mais la résistance du fil devient m^2 fois plus grande. On déduira des changements de la durée de l'oscillation et de la résistance, que la sensibilité normale augmente m fois. C'est pourquoi il sera nécessaire de se servir d'un fil *au plus petit diamètre possible*.

Quant aux deux susdites modifications, il s'agit de diminuer autant que possible le poids et en conséquence le moment d'inertie du cadre. Il va de soi qu'on ne pourra en tirer profit que si le poids du miroir peut être négligé.

On peut aussi supprimer le miroir et observer directement les oscillations du fil au moyen d'un microscope. Enfin il ne faut qu'un pas pour passer du cadre ne portant qu'un seul tour de fil très fin, à la corde tendue. ¹⁾

Outre la grosseur la longueur de la corde influe aussi sur la sensibilité normale du galvanomètre. Si la corde est p fois plus courte, la sensibilité normale est \sqrt{p} fois plus grande.

La matière dont on construit la corde doit avoir à côté d'une grande conductibilité L un petit poids spécifique S . Si $\frac{S^2}{L}$ est un minimum, les conditions les plus favorables au sujet de la matière sont réalisées.

¹⁾ M. ADER construisit déjà un instrument avec une corde tendue entre les pôles d'un aimant. C'était un récepteur pour la télégraphie. Au moyen d'une gaine en moelle de plume on grossissait la corde au milieu, c'est à dire à l'endroit où ses mouvements étaient photographiés. Comptes Rendus de l'Ac. d. Sc. 1897, T. 124, p. 1440.

Mais comment mesurer la sensibilité normale d'un galvanomètre sans miroir et dont la partie mobile est observée au moyen d'un microscope? Le terme „sensibilité normale” n'a été employé jusqu'ici que pour des instruments où la lecture se faisait par la méthode du miroir, et ce qu'il y a de singulier, c'est qu'on n'a jamais tenu compte de la grandeur du miroir. Un miroir de 3 mm. de diamètre, employé dans le système d'aiguilles léger d'un galvanomètre cuirassé de DU BOIS et RUBENS produit de chaque point de l'échelle se trouvant à 5 mètres de distance un cercle de diffraction d'environ 1 mm. de diamètre. Sans compter l'éclairage faible, il sera donc très difficile d'observer une déviation d'une petite fraction d'un millimètre. En employant un plus grand miroir le cercle de diffraction variera en raison inverse du diamètre du miroir. Aussi il me semble, qu'il vaudra mieux tenir compte du diamètre du miroir en donnant la sensibilité normale d'un instrument.

Si nous prenons comme base du calcul de la sensibilité normale un rayon de miroir de 1 mm., la valeur que MM. DU BOIS et RUBENS donnent pour leur galvanomètre cuirassé à système d'aiguilles léger, s'élève de 1000 à 1500.

La portée de la „sensibilité normale”, exprimée de cette manière, se maintient, quand on remplace l'observation faite au moyen d'un miroir par l'observation microscopique. Car le grossissement convenable obtenu à l'aide d'un microscope est limité par la même diffraction de la lumière que la réduction du rayon du miroir ou l'augmentation de la distance de l'échelle. Ainsi pour comparer la sensibilité il faut appliquer un grossissement microscopique tel, que les cercles de diffraction deviennent aussi grands que si l'on s'était servi du miroir. La valeur du grossissement est alors exprimée par

$$v = N \times \frac{d}{2r},$$

où v représente le grossissement de l'image microscopique, N l'ouverture numérique de l'objectif, r le rayon du miroir et d la distance de l'échelle jusqu'au miroir.

L'ouverture numérique des meilleurs objectifs à sec est de 0,95. Si l'on prend comme base du calcul de la sensibilité normale $d = 1000$ et $r = 1$, le grossissement admissible est de $v = 475$.

Qu'il nous soit permis maintenant d'ajouter aux observations théori-

ques précédentes quelques remarques pratiques. Quelque grande que puisse être la sensibilité normale d'un galvanomètre, celui-ci ne servira pas à notre but s'il ne permet pas de mesurer un courant très faible, la déviation n'étant que médiocrement rapide. Puis l'amortissement doit répondre à certaines conditions, car une oscillation non amortie anéantirait tout l'avantage d'une déviation rapide.

Les déviations sont-elles bien proportionnelles aux intensités du courant? L'observateur ne sera-t-il pas gêné pendant ses mesures par les vibrations du sol et par des courants d'air, au point qu'il ne pourra pas se servir de l'instrument? Et quelle est en somme la sensibilité normale qu'on pourra atteindre?

Comme nous l'avons exposé plus haut le diamètre de la corde est un des éléments les plus importants. Des fils ou des rubans métalliques, dont on pourrait se servir et qui seraient assez fins pour le but que nous nous sommes proposé, ne se vendent pas. On doit donc les préparer soi-même et on pourra non sans succès se servir d'aluminium en feuilles de livret. Une feuille d'aluminium, qui, comme on le pourra constater facilement au moyen de la balance, n'est épaisse que de $0,75 \mu$, est coupée en bandes de la façon dont un relieur coupe les feuilles d'or pour la dorure des livres. On colle une bande de quelques millimètres de largeur au moyen de vernis sur une plaque de verre, et on la divise ensuite avec un couteau bien tranchant en bandes étroites. Nous n'avons pas réussi à tendre dans le galvanomètre de bandes plus étroites que de $0,3$ ou $0,4$ mm., mais avec celles-ci nous avons déjà obtenu des résultats assez satisfaisants.

En se servant des fils de quartz rendus conductibles par l'argenture, on arrive à une amélioration assez considérable. Voici en quelques mots les résultats de quelques unes de nos expériences.

Un fil de quartz argenté, de $2,1 \mu$ de diamètre et long de 13 cm., est tendu dans un champ magnétique très intense, évalué à plus de 30000 C. G. S. La résistance s'élève à 20300 ohms. Les mouvements grossis 400 fois, sont projetés sur une fente, derrière laquelle on fait passer une plaque photographique. À côté de la fente se trouve une échelle divisée en millimètres et permettant de mesurer les déviations pendant qu'on photographie les mouvements de la corde.

On commence par tendre la corde faiblement. Un courant de 10^{-8} amp. produit une déviation de $5,6$ mm. Les déviations sont proportionnelles aux intensités des courants et égales à droite et à gauche en

tant qu'elles se bornent aux dimensions de l'échelle. L'instrument est placé sur un pilier et bien que nous n'ayons pas pris d'autres mesures pour mettre l'appareil à l'abri des vibrations du sol, et que nous n'ayons par conséquent pas appliqué la méthode de suspension de M. JULIUS ou la méthode de faire flotter l'instrument sur du mercure, la corde ne montre pas la moindre vibration. Nous avons aussi garanti l'appareil des courants d'air et le zéro semble être absolument constant. Une déviation de 0,1 mm. pouvant encore être observée, un courant de $1,79 \times 10^{-10}$ amp. se mesure également. Ainsi l'instrument doit être rangé parmi les plus sensibles galvanomètres.

On doit considérer que nous ne communiquons ici que quelques observations préliminaires et qu'il n'est pas douteux que les expériences poursuivies nous apprendront que les mesures pourront se faire avec un fil de quartz encore plus fin et moins tendu, de sorte qu'on pourra démontrer des courants bien plus faibles.

Les mouvements du fil peu tendu subissent à un haut degré l'influence de l'amortissement produit par l'air; plus le fil est fin plus l'amortissement est intense. Car le poids du fil varie en raison directe du carré du diamètre, tandis que la résistance de l'air est proportionnelle à cette dimension. Avec la susdite tension de corde, un courant de 10^{-8} amp. produisant une déviation de 5,6 mm., le mouvement est absolument apériodique. La courbe tracée sur la plaque photographique est la

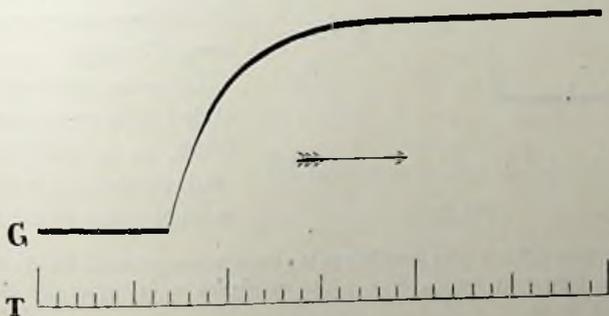


Fig 3.

A peu près 2,5 fois plus grande que le photogramme primitif. Le fil de quartz n'est tendu que très faiblement. Une résistance de 1 mégohm est montée en série dans le circuit du galvanomètre.

G = Courbe, tracée par le fil de quartz pendant qu'on y fait passer subitement un courant de 2×10^{-8} amp.

T = Temps en centièmes de seconde.

représentation graphique d'une fonction exponentielle, v. fig. 1, et est conforme à la *courbe normale*, tracée par l'électromètre capillaire de M. LIPPMANN. ¹⁾ La vitesse de l'image du fil de quartz est de 35 cm. par seconde au moment où elle se trouve à 1 cm. de sa position d'équilibre.

Pour le susdit exemple l'amortissement électromagnétique ne comptait pas, parceque une résistance de 1 mégohm était montée en série dans le circuit du galvanomètre. L'amortissement électromagnétique se fait cependant valoir perceptiblement, quand on intercale une petite résistance entre les deux extrémités de la corde. L'amortissement total est alors augmenté, l'amortissement électromagnétique étant ajouté à l'amortissement produit par l'air. La courbe, tracée sur la plaque photographique, est encore la représentation graphique d'une fonction exponentielle. Cependant il se trouve que la vitesse de l'image du fil de quartz au moment où celle-ci est à 1 cm. de sa position d'équilibre, se réduit à 25 cm. par seconde.

Si la corde est tendue plus fortement, il faut une plus grande intensité du courant, pour obtenir la même déviation, mais la rapidité de la

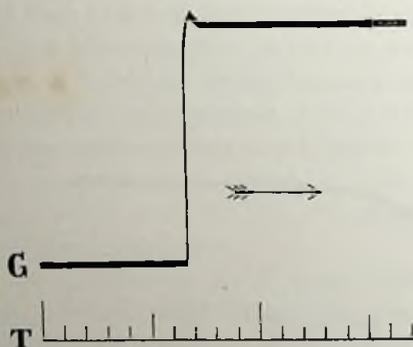


Fig. 2.

déviations augmente. L'amortissement a moins d'influence et même, avec une tension suffisante, le mouvement de la corde devient oscillatoire. L'expérience suivante pourra servir d'exemple.

Entre les extrémités du fil de quartz assez fortement tendu, on a intercalé une petite résistance. On fait passer subitement un courant de

A peu près 2,3 fois plus grande que le photogramme primitif. Le fil de quartz est assez fortement tendu. Une petite résistance a été intercalée entre les extrémités du fil.

G = Courbe tracée par le fil de quartz pendant le passage subit d'un courant de un micrampère.

T = Temps en centièmes de seconde.

¹⁾ Voir plusieurs articles dans PFLÜGER'S Arch. f. d. gesammte Physiol. Bd. 56, 60 et 79, ainsi que dans „Onderzoekingen” Physiol. laborat, Leiden, II, T. 1-4.

1 micrampère par le galvanomètre. L'image du fil de quartz marque une déviation permanente de 14,4 mm., de sorte que la déviation pour un courant égal est devenu $\frac{560}{14,4} = 39$ fois plus petit.

Le mouvement, quoique fort amorti, est encore oscillatoire, v. fig. 2. Une oscillation s'accomplit en 0,003 sec. et le décréent logarithmique est de 3,09.

Si l'on monte en série dans le circuit du galvanomètre une résistance de 1 mégohm, l'influence de l'amortissement électromagnétique est à peu près nul. Seul l'amortissement produit par l'air reste. Avec la même tension de fil la déviation permanente se maintient pour un micrampère, mais la durée d'une oscillation est un peu raccourcie et le décréent logarithmique est réduit de 3,09 à 2,2.

La sensibilité normale de l'instrument est évaluée à 6×10^5 .